

欧洲先进压水堆机组 GRE 负荷速降研究及处理

黄荣飞, 任江

台山核电合营有限公司, 广东 江门 529228

摘要 : 负荷速降是指汽轮发电机组突然快速卸掉部分负荷的一种故障现象。负荷速降故障的发生对核电机组的安全稳定运行影响较大, 必须引起运行值班人员和相关专业人员的高度重视。本文对欧洲先进压水堆机组汽机负荷速降风险和原因进行分析, 并对负荷速降结束后如何稳定机组以及欧洲先进压水堆机组设置的高/中压缸相互作用进行简要分析。

关键词 : 欧洲先进压水堆; GRE; 汽轮机; 负荷速降; 甩负荷

Study and Treatment of GRE load Speed Drop in European Advanced Pressurized Water Reactor Unit

Huang Rongfei, Ren Jiang

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd. Jiangmen, Guangdong 529228

Abstract : The load speed drop refers to the fault phenomenon of the steam turbine generator set suddenly and quickly unloading part of the load. The occurrence of load drop failure has a great impact on the safety and stable operation of nuclear power units, which must be paid great attention to by the operation duty personnel and related professionals. This paper analyzes the risk and cause of load drop in the European advanced PWR unit, and briefly analyzes how to stabilize the unit and the interaction of high / medium pressure cylinder set after the load drop.

Keywords : European advanced pressurized water reactor; GRE; steam turbine; load speed reduction; load rejection

引言

基于纵深防御的理念, 欧洲先进压水堆反应堆设计了一系列负荷速降信号用于保护反应堆和汽轮机的安全。负荷速降是机组功率快速大幅度波动的一种瞬态, 对机组的稳定运行造成较大的影响。如果控制系统或运行值班人员没有正确响应, 有可能导致更严重的事故发生。因此运行值班人员和相关专业人员只有非常清楚负荷速降的危害和原因, 才能在负荷速降故障发生时及时响应和正确处理故障^[1]。

一、汽机负荷速降的危害

汽轮发电机组负荷速降, 不仅给电网的稳定运行带来了一定的不利影响, 而且直接对核电机组的安全运行构成了威胁, 其危害性主要表现在以下几个方面:

(1) 负荷速降是造成汽轮发电机组超速的主要因素。

超速的结果可能会造成超速保护动作而停机, 更严重的情况还会造成汽轮发电机组因飞车而毁坏^[2]。

(2) 负荷速降对汽轮机造成较大的热力冲击。

负荷速降时机组负荷发生了大幅度的变化, 则进入汽轮机的蒸汽量随之而减小, 由于调速汽门的节流作用, 通过汽轮机通流部分的蒸汽温度将发生大幅度的降低, 使汽缸、转子表面受到急剧冷却, 致使其遭受很大的热应力。

(3) 负荷速降过程伴随着较大的机械冲击和振动。

负荷速降后由于机组负荷的突然改变, 使流经汽轮机通流部分的蒸汽流量和参数随之改变, 则作用于转子上的轴向推力也发生了变化, 造成推力轴承和联轴器螺栓受到较大的机械冲击。并且原来运行相对平稳的转子受到不平衡的汽流冲击, 诱发机组振动加剧^[3,4]。

(4) 负荷速降会导致蒸汽发生器水位波动, 有可能导致蒸汽发生器水位低1而停堆。

负荷速降开始时, 汽轮机进气阀关小, SG内压力上升, 由于“压水效应”导致SG液位降低。为了维持水位, SG给水系统将开大给水调节阀, 进而使大量的冷水进入SG, 从而导致SG内水体积收缩, 液位进一步下降。如果此时水位调节系统异常, 有可能导致SG液位低于13.8 m而跳堆(针对欧洲先进压水堆机组)。

(5) 负荷速降还可能导致压力容器超压, 从而引起跳堆或安全阀动作。

作者简介: 黄荣飞(1983.01-), 男, 汉族, 山东临沂, 工程师, 大学本科, 核电运营。

当汽机负荷速降时，由于反应堆功率变化速度较汽机慢，造成一回路功率大于二回路的现象，结果一回路温度上升，一回路冷却剂因温度升高体积变大而“挤进”稳压器。进而导致一回路压力上升。如果压力调节系统不能正常响应，有可能导致堆堆或安全阀动作^[5]。

二、欧洲先进压水堆机组汽机负荷速降信号

欧洲先进压水堆机组所有负荷速降信号都是通过汽轮机调节系统（GRE）作用于汽轮机进汽调节阀，减少进汽，进而使负荷快速下降。汽轮机负荷速降以后，控制方式转为直接模式，直接模式的特点是功率整定值整定出蒸汽流量，然后由蒸汽流量再计算出阀门开度。此时阀门迅速响应功率（功率是按照限制的方式输入到 GRE 系统）关闭到一个开度（此开度为正常运行时，蒸汽参数稳定情况下计算得出，而且是固定的，即是一个功率对应一个开度）。根据 GRE 及相关系统的 PFUP（Process Function Plan）图，相关系统的 SDM（System Design Manual）以及 RCSL（反应堆控制、监视和限制系统）逻辑图，可以查找出导致汽轮机负荷速降信号产生的原因有以下几个方面：

（1）CEX 系统故障导致的负荷速降

保护目的：在正常运行期间，在 CEX 系统供水能力不足的情况下快速降低汽轮机负荷，避免 ADG 液位降低导致 APA 泵跳闸，进而避免 SG 水位低导致停堆。

保护原理：在发电机功率高于 40%Pn 时，如果只有 1 台 CEX 泵运行且泵出口阀门开启，机组将以 10%Pn 为目标负荷，以 200%Pn/min 的速率进行负荷速降。但是，当降至 40%Pn 时，此负荷速降信号将会消失，之后功率不再下降。

（2）APA 系统故障导致的负荷速降

保护目的：在正常运行期间，在 APA 系统供水能力不足的情况下快速降低汽轮机负荷，避免 SG 水位低导致停堆。

保护原理：当有给水泵再启动一台 APA 泵信号但是没有给水泵可以启动时，产生一个带记忆的负荷速降信号，同时记忆当前的汽机功率，机组功率以 70%Pn/min 的速率降负荷 35%Pn。当汽机功率降低 35%Pn 或者汽机功率小于 30%Pn 后复位负荷速降信号。其逻辑简图如图 1 所示：

（3）GSY 系统故障导致的负荷速降

保护目的：当 GSY 系统出现故障时，如风机均丧失或温度高，为避免导体温度高持续发热，造成封闭母线绝缘下降或损坏，设置 GSY RUNBCAK 信号，及时降低汽轮发电机组负荷。

保护原理：

失去 IPB（分相隔离出线套管）通风：在机组功率高于 55%Pn，正常运行时发电机分相隔离出线套管风机 GSY2110ZV/2120ZV 一台运行一台备用，当运行的风机跳闸，运行 / 备用信号启动备用风机，经过一定延时后备用风机没有启动。同时 IPB 主导体温度高于 97℃，机组将以 10%Pn 为目标负荷，以 10%Pn/min 的速率进行负荷速降，如果温度没达到 97℃则延时 20 分钟触发。但是，当降至 55%Pn 时，此负荷速降信号将会消失，之后功率不

再下降。

（4）GSS 系统故障导致的负荷速降

保护目的：当 GSS 出现故障时，如冷凝水箱水位高或加热器意外隔离，为避免汽轮机进水、剩余运行的 GSS 加热器蒸汽压力过高 / 流量过大以及反应堆超功率，设置 GSS RUNBCAK 信号，及时降低汽轮发电机组负荷。

保护原理：

a)GSS 第一类故障导致的负荷速降

当汽机功率在 30%Pn 以上时，第一级冷凝水箱水位高于 2000mm，或者第 1 级加热器隔离，第 2 级加热器的冷凝水箱水位高于 2600mm。机组将以 100Pn/min 降至 30%Pn。

b)GSS 第二类故障导致的负荷速降

出现下列信号中的 1 个时，出现 GSS RUNBACK2 信号：

当汽机功率在 20%Pn~30%Pn 之间时，第 1 级加热器隔离，第 2 级加热器的冷凝水箱水位高于 2600mm；

当汽机功率大于 20% 时，第 1 级加热器与第 2 级加热器隔离。

当功率降至 20%Pn 时，该负荷速降信号消失，机组停止降功率。

c)GSS 第三类故障导致的负荷速降

机组功率高于 92.4%Pn 时，GSS 第 1 级加热器隔离。出现 GSS RUNBACK3 信号。

机组降以 5%/ 分的速率降至 92.4%。降至目标负荷后，机组停止降功率。

d)GSS 第四类故障导致的负荷速降

机组功率高于 90%Pn 时，GSS 第 2 级加热器隔离。出现 GSS RUNBACK4 信号。

机组降以 5%/ 分的速率降至 90%。降至目标负荷后，机组停止降功率。

三、欧洲先进压水堆机组汽机负荷速降后的处理

负荷速降信号出现时，机组会出报警 GRE 1118KA，为 2 级报警。负荷速降信号生成的“FAST UNLOADING”会给 GRE 1101CG - 发出一个 ptyA1 信号，使其处于 C1 位置。所以如果负荷速降信号不消失或者信号消失后没有手动切换至 C2 位置的话，机组功率参考值不再随着目标负荷变化。

负荷速降结束以后，首要任务是稳定机组，然后再进行后续处理。对于主控操纵员正确的操作步骤如下：

1) 在 GRE 0003YC 页面检查“Runback in Progress signal”提示信息出现。

2) 查找导致负荷速降的原因（根据前面列举的每个负荷速降信号的不同特点，查找原因）。

3) 根据当前汽机负荷调整高压缸入口压力限值。

4) 复位汽机控制内部锁，将 GRE1113CG - 置 C1。

5) 调目标功率 = 当前实测功率。

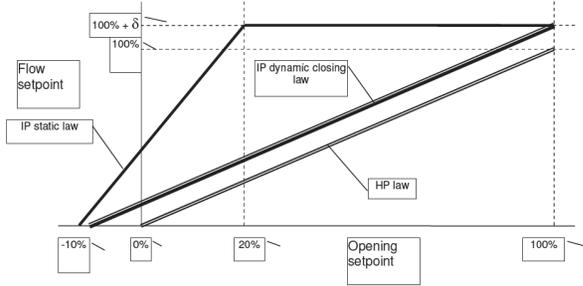
6) 将 GRE 1111CG - 置 C2，将控制模式切到“自动模式”。

7) 将 GRE 1101CG - 置 C2 位置, 释放负荷控制。

自此, 负荷速降结束后, 机组已稳定在当前功率。后续再联系专业处进一步查找故障和处理^[6]。

四、欧洲先进压水堆机组 GRE 阀门特性

欧洲先进压水堆机组 GRE 系统 SDM 中描述, 中压缸进口调节阀与高压缸进口调节阀之间的开关先后顺序如图 1 所示:



> 图 1: 中压缸阀门开启设定曲线

通过图中可以看出, 中 / 高压缸调节阀分别按照其 “IP static law” / “HP law” 线性开启, 中压缸调节阀在汽轮机功率为零时就有一定的开度。而且开启速度比高压缸调节阀要快 (“IP static law” 斜率比 “HP law” 大)。

汽轮机在中压缸大约最大开度的情况下运行, 此时如果有 “降负荷” 的信号, 中压缸调节阀会沿着 “IP dynamic closing law” 和 “IP static law” 之间的区域进行关闭, “IP dynamic closing law” 线与 “HP law” 平行, 可以保证关闭的速度与高压缸相同, 而且后期要比高压缸开度稍大^[7,8]。

与 M310 机组相比, 欧洲先进压水堆机组多了一个中压缸。通过分析可以看出, 如此设计的目的就是为了保证 GSS 系统压力

不会增加, 进而保证汽轮机的稳定运行, 防止高压缸排气压力超过 13.8 bara 而导致跳机^[9,10]。

在负荷快速变化时, 如果中压缸调节阀先于高压缸调节阀开启, GSS 内的压力就会被憋高, 很可能导致 GSS 系统超压, 进而导致高压缸排气压力高跳机。同样, 如果中压缸调节阀先于高压缸调节阀关闭, 也会存在同样风险。同时中压缸调节阀的延时关闭, 也防止了汽机超速的风险 (如果高压缸进口阀门不能正常关闭, 中压缸阀门的关闭可以防止汽机超速)。因此可以看出设置高 / 中压缸这种相互作用, 在负荷速降时也是非常重要的。

五、结语

通过以上的分析, 可以看出, 负荷速降本质上只是机组自我调节和稳定的一种手段。在发生某些特定故障时, 机组通过快速降低负荷以便将机组带到一个更安全的状态。相比于 M310 机组, 欧洲先进压水堆机组 GRE 系统控制更加智能化、自动化。同时欧洲先进压水堆机组也增加了许多负荷速降信号, 使负荷速降保护的覆盖范围更加广泛。

在欧洲先进压水堆机组, 一旦发生负荷速降工况, 负荷速降的过程中, 操纵员是不需要做任何操作的。操纵员所做的工作, 就是负荷速降结束之后机组的稳定工作。但是, 正是由于其更加智能化、自动化, 使得欧洲先进压水堆机组 GRE 系统的内部逻辑相当复杂。这给操纵员和相关专业人员熟练掌握该系统增加了难度。也导致一旦发生控制系统不能及时响应的时候, 操纵员和专业人员不能够及时有效的进行人为干预。如果在不清楚其内部逻辑的情况下, 草率干预, 甚至可能使机组状况恶化, 进而导致更严重的后果。

参考文献

[1] 台山核电合营有限公司. EPR 机组智能化控制的设计原理 [M]. 原子能出版社 2019.
[2] 黄树红. 汽轮机原理 [M]. 中国电力出版社 2008.
[3] 肖增弘. 汽轮机设备及系统 [M]. 中国电力出版社 2008.
[4] 顾颖宾. 核电厂电气原理与设备 [M]. 原子能出版社 2010.
[5] 王勇. 电厂汽轮机设备及运行 [M]. 中国电力出版社 2010.
[6] 张涛. 核电厂操纵人员应知应会 [M]. 原子能出版社 2015.
[7] 阎克智. 核电厂通用机械设备 [M]. 原子能出版社 2010.
[8] 单建强. 压水堆核电厂系统与设备 [M]. 西安交通大学 2021.
[9] 广东核电培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备 [M]. 原子能出版社 2005.
[10] 陆道纲. 二代和三代压水堆核电厂系统与设备 [M]. 中国电力出版社 2023.